第5章

センサ・ネットワーク端末を年単位で稼働させる省電力技術

メッシュ型トポロジと専用OSで消費電力を削減

John Suh, Michael Horton, 中村千代賢

ここでは，米国University of California, Berkeley（UC Berkeley）が中心となって規格化を進めている無線センサ・ネットワーク「SmartDust MICA Mote」について説明する．本センサ・ネットワークはメッシュ型のトポロジと専用の通信プロトコルによって省電力を実現するように設計されている．

（編集部）

センサ・ネットワークは，多数のセンサを配置し，情報を収集する無線システムです．シリコンMEMSセンサや低消費電力のマイクロコントローラ，LSI化された無線デバイス，アドホック型の通信プロトコル，組み込みシステム向け専用OSなどの発展によって，実用化されつつあります．

センサ・ネットワーク技術を用いれば，屋内（家庭，オフィス，工場）や屋外など，わたしたちを取り巻く環境で発生するイベント（事象）の監視や認識，分析の能力を向上させることができるでしょう．

● センサ・ネットワークが抱える三つのコンセプト

無線センサ・ネットワークは，いくつかの重要な特徴を持つことから，ほかのタイプの無線ネットワークと区別されています．

まず一つ目の特徴は，無線端末（以下，ノードと呼ぶ）の大きさです．センシング機能，制御機能，無線通信機能を兼ね備えたネットワーク・ノードが小型（mm単位のシリコン・チップ・サイズから携帯端末サイズまで）であることが求められます．

二つ目の特徴は，これらのノードに厳しい電力条件が求められるという点です．通常，これらのノードは電池駆動です．携帯電話や無線携帯機器の場合と異なり，センサ・ネットワークのノードを定期的に充電することは不可能です．したがって，これらのノードは保守が行われず，設置後，長期間にわたって稼働できるように，細部にわたって省電力化のくふうが施されています．

三つ目の重要な特徴は，各ノードに同一のピア・ツー・ピアの通信プロトコルが実装されていることです．この通信プロトコルは，独立した複数のノードをメッシュ・ネットワーク[注1]として機能させます（**図1**）．これにより，ネットワーク内のセンサ（ノード）は，インフラに依存しない，

注1：各ノードがルータやアクセス・ポイントの機能を持つことで，ノードどうしが相互に接続し合うネットワーク．マルチホップ・ネットワークとも言う．

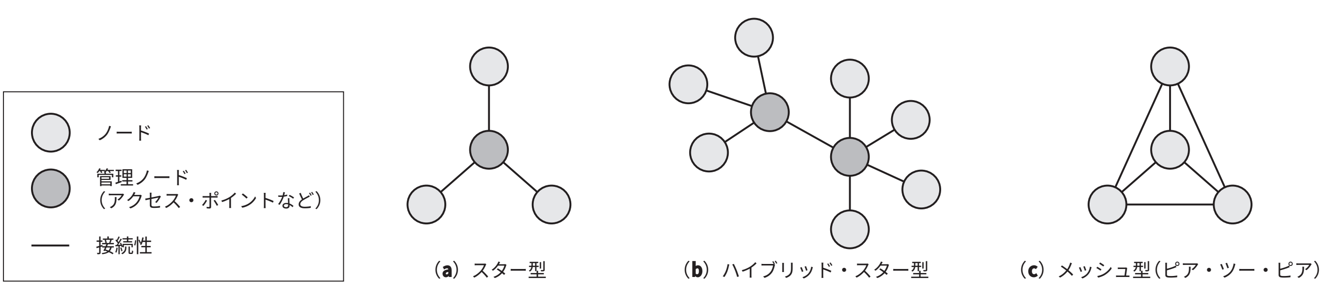


図1　ネットワーク・トポロジ

表1　MICA Moteの導入事例

応用分野	設置場所	利用されるセンサ	イベント	メリット	状況
野生動物	生息する島	温度，赤外線，湿度，RSSI（無線強度）	動物の生態の監視	自然観察	2002年から稼働中
保守	工場	振動，温度，赤外線	機械の監視	障害発生前に機械を保守できる	2003年から稼働中
追跡	建物	速度計，RSSI	人間および資産の追跡	訪問者/資産の所在の追跡	2004年から実験中
山崩れ	農村地域	速度，磁気，温度，湿度	災害制御	即座の警告	2003年から実験中
農業	農村	温度，湿度，光	環境の監視	精密農業と農産物改良	2001年から稼動中
災害	森林火災/被災地域	温度，赤外線，磁気，超音波	地域の監視	消防/軍の効率化	2002年から実験中
交通	高速道路	磁気，音声，速度，赤外線	車数のカウント，交通の監視	低コストの設置	2004年から実験中

拡張性が高い，通信のエネルギー効率が良い，という三つのメリットを得ることができます．また，メッシュ・ネットワークはトポロジに冗長性を持たせているので，各センサ・ノードや無線リンクの障害に対するロバスト性（堅ろう性）を備えています．

● メッシュ・ネットワークのエネルギー効率が良い理由

同一距離の通信を想定した場合，メッシュ・ネットワークは同等機能のシングルホップ・ネットワーク注2よりもエネルギー効率が優れています．この点を以下に例を挙げて説明します．

ホップ（あるルータから次のルータに移動する経路）間の距離を均等とすると，任意のノードから基地局までの伝送距離は$N \cdot r$となります（Nはホップ数，rは一つの無線リンクの距離）．一つのノードにおける特定のエラー・レートでの受信時最小電力を$P_{MinReceive}$，最初のノードおよびそれに続く中継ノードの電力を$P_{Transmit}$と定義すると，地上付近のRF減衰モデルは以下のように表されます．

$$P_{Min\,Recieve} \propto \frac{P_{Transmit}}{r^{\alpha}}$$

または，

$$P_{Transmist} \propto r^{\alpha} P_{Min\,Receive}$$

注2：アクセス・ポイント（基地局）を介してノード間の通信を行うネットワーク．スター型やハイブリッド・スター型などがこれにあたる．

注3：SmartDustは，UC Berkeleyが主体となり，米国国防省の研究開発部門DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）が主導するユビキタス社会実現のためのセンサ・ネットワークに関する計画．コンピュータが究極的にはちり（dust）のように小さくなり，しかも無線通信機能を搭載するため，物理空間とコンピュータ空間が人間の意識するところなくつながるという世界を実現することを目的としている．MICA Moteは米国Crossbow Technology社が開発した無線センサ・ネットワークの名称．

ここで，rは最小距離，αはRF減衰指数です．環境によるマルチパスや干渉の影響は変化するため，通常αの値の範囲は2～5となります．したがって，同一距離のシングルホップと比較した場合，任意のノードから基地局へのNホップ・パスの省電力の効果は以下のように算出できます．

$$\eta = \frac{P_{Transmit(N \cdot r)}}{N \cdot P_{Transmit(r)}} = \frac{(N \cdot r)^{\alpha} \cdot P_{Min\,Receive}}{N \cdot r^{\alpha} \cdot P_{Min\,Recieve}} = N^{(\alpha-1)}$$

RF伝送のみを考えると，ホップ数Nが増加するにつれて，省電力効果が大きくなります．ただし，この分析ではメッシュ・ネットワークのプロトコル・スタックが必要とする電力や帯域幅の問題を考慮していません．しかし，実際にメッシュ・ネットワークを利用してみると，省エネルギーやハードウェア・コスト，堅ろう性，データ遅延などのバランスが取れていることを実感できます．

このようなメッシュ・ネットワークに対応した無線センサ・ネットワークの一つに「SmartDust MICA Mote注3」があります．このセンサ・ネットワークはまだ新しい技術ですが，すでに複数の分野で導入された実績があります（**表1**）．ただし，今後，広く普及するためには，技術的課題や経済的課題，さらには公共政策にかかわる多くの課題を解決する必要があります．以下に本センサ・ネットワークのハードウェア/ソフトウェアの概要や機能ごとのノード要件などを説明します．なお，ここでは上記の各課題についての検証などは行いません．

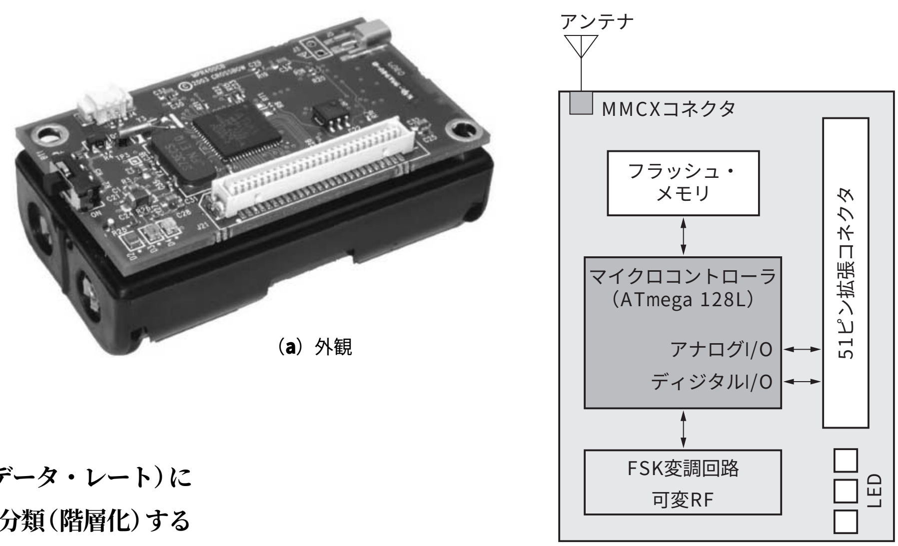
1　センサ・ノードの分類

現在のセンサ・ネットワークでは，一つのシステムに対して数百または数千のセンサを設置できます．初めにセンサ・ネットワークを導入したとき，こうしたシステムでは，

表2　ノードの分類

ノードの種類（製品例）	外形寸法	用　途	データ・レート（bps）	ハードウェア仕様			消費電力	
				CPU性能（MIPS）	フラッシュ・メモリ（バイト）	RAM（バイト）	動作時（標準値）	待機時（標準値）
専用センシング・ノード（Spec）	数mm^3	専用低帯域センサまたは高度なRFタグ	最大50k	最大5	最大0.1M	最大4k	1.8V×10mA（～15 mA）	1.8V×1 μA
汎用センシング・ノード（MICA2）	1～10 cm^3	汎用センシング，通信中継	最大100k	最大10	最大0.5M	最大10k	3V×15mA（～25 mA）	3V×15 μA
広帯域センシング・ノード（MICAz）	1～10 cm^3	広帯域センシング（映像，音声，振動）	最大215k	最大50	最大10M	最大128k	3V×60mA	3V×30 μA
ゲートウェイ（Stargate）	10 cm^{3}以上	広帯域センシング，通信ゲートウェイ	500k～10M	100以上	32M以上	512k以上	3V×200mA	3V×10mA

図2
汎用センシング・ノードの例
図に，汎用センシング・ノードの一つである米国Crossbow Technology社の「MICA2」を示す．マイクロコントローラとして，米国Atmel社の「ATmega 128L」を搭載している． FSK（周波数偏移変調）方式によって，最大38.4 kbpsのデータ・レートを実現する．300MHz～1GHzの無線帯域に対応する．アンテナは周波数帯域によって長さが異なる（写真には示していない）．



（**a**）外観

（**b**）ノードの構成

センサの種類や必要とされる通信速度（データ・レート）に応じて，ノードを以下の四つのクラスに分類（階層化）する必要があることがわかりました（表2）．

- **専用センシング・ノード（センサ，RFIDタグそのもの）**
- **汎用センシング・ノード（単純な機能を搭載）**
- **広帯域センシング・ノード（高速データ・レートに対応）**
- **ゲートウェイ（LANへのインターフェース）**

いちばん上はセンシングを行う単純なノードで，下にいくほど複雑な機能を搭載し，データを収集して分析したり，格納するという構成になっています．つまり，高位のノードが低消費電力で低コストのセンサ・ノードを駆動する分散型のインフラストラクチャを形成します．この階層型アーキテクチャは，すべてのセンサ・ネットワークに共通です．

● 必要に応じてノードを使い分ける

上記の分類を，センサ・ネットワークを応用した高度なセキュリティ・システムで考えてみましょう．こうしたケースでは，ネットワークは膨大な数の独立したノードで構成されていますが，一つのまとまったシステムとして機能しなければなりません．

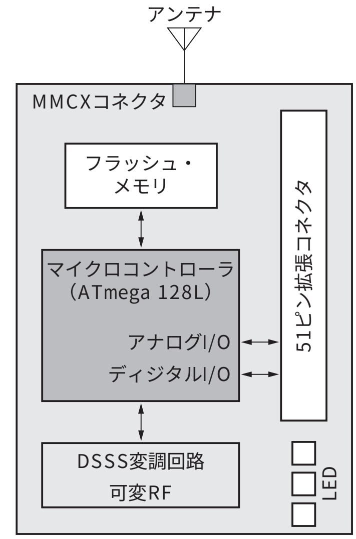
一つのセキュリティ・システムで利用されるセンサの大半は，近接センサ，光センサ，動き検知センサなど単純なもので，侵入検知のために窓やドアに設置されます．これらのセンサは，上述の汎用センシング・ノードに搭載されます（図2）．このタイプのセンサは，特定用途向けの単純な機能を装備しており，電池で長期的駆動する必要があります．また，生のセンサ・データを処理/分析するために使用するアルゴリズムは単純で，CPUとメモリについて最小限のリソースしか必要としません．また，ノードの入出力データ・レートも最小限に抑えられます．

このようなセキュリティ・システムでは，カメラや音響センサ，化学検出器などの高度なセンサが必要な箇所に配置されます．これらのセンサは，イベントが発生したかどうかを判断する処理に多くのリソースを必要とします．また，イベント・レポートなどを提供するため，データ・レートを高くしなければなりません．そのため，広帯域センシング・ノードに搭載されます（図3）．例えば，移動する

図3
広帯域センシング・ノードの例
Crossbow社の「MICAz」を示す．DSSS（direct sequence spread spectrum；直接拡散方式）により，最大250kbpsのデータ・レートを実現する．物理層インターフェースは，IEEE 802.15.4に準拠している．本ノードは，FCC（米国連邦通信委員会）および日本の電波法に基づく認証を取得している．



（a）外観



（b）ノードの構成

物体を追跡したり，予期していなかった動きを検知するためには，画像の分析が必要となる場合があります．このとき，イベントが検出されると，高速なデータ・レートを備えたノードはネットワークに映像ストリームを伝送します．これらのノードは電池駆動に加えて，長期的に稼働するために有線の電力供給も必要となります．

すべてのセンサは，シングルホップ・ネットワーク，またはメッシュ・ネットワークを介して制御センタと通信します．メッシュ・ネットワークには，システムの一部として各センサの読み込みデータを処理・格納する一つまたは複数の基地局（ゲートウェイ）を備えています．ゲートウェイは，ほかのノードよりも広帯域，低遅延のピア・ツー・ピアのネットワークを実現し，より多くのネットワーク・トラフィックを取り込んで伝送します．

2 メッシュ・ネットワーク対応通信プロトコル

無線センサ・ネットワークには，新しいハードウェアだけでなく，新しいソフトウェアも必要になります．従来のネットワークの抽象化の概念は，無線センサ・ネットワークに適していないからです．

組み込みソフトウェアは，ハードウェアを正確に制御するとともに，アプリケーションに特化した通信プロトコルを実装できなければなりません．また，無線センサ・ネットワーク用のOSは，必要に応じて高位層のアプリケーション・ソフトウェアが下位層のハードウェアを直接，かつ効率的に制御できるようになっている必要があります．

また，アプリケーション・ソフトウェアは，各センサに対して正確に規定の電源を供給したり，データが転送された直後にメモリ・システムの電源をOFFにしたり，RSSI（Received Signal Strength Indicator；受信信号強度の表示信号）を見てルーティングの決定（電波の情況に応じた経路の選択）を行わなければなりません．このように，アプリケーション・ソフトウェアには，容易にプログラミングできて，かつ正確なハードウェア制御を効率良く行うという大きな課題が存在します．

これらの課題に対して，無線センサ・ネットワークに特化した組み込みOS「TinyOS」が開発されました．本OSは，ゲートウェイおよび広帯域センシング・ノードで使用されます．

● アプリケーション・ソフトによる正確なハード制御

本OSは，無線センサ・ネットワーク「SmartDust MICA Mote」に対応しています．本OSは，リソースに制約があるハードウェア上で動作するように設計されており，ファイル・システムを持たず，静的なメモリ割り当てを行います．シンプルなタスクとイベント・モデルを実装し，最小限のネットワークの抽象化機能を提供します．

本OSで動くアプリケーション・ソフトウェアはモジュール化しやすく，OSの必要部分のみがアプリケーション・ソフトウェアとともにコンパイルされます（**図4**）．

本OSは，下位のハードウェア制御機能を，コンポーネント化を通じて提供することで，従来型の階層をなくしています．このソフトウェア抽象化では，アプリケーション・レベルのコンポーネントが必要に応じてハードウェアに直接アクセスできるように設計されています．ほかにこ

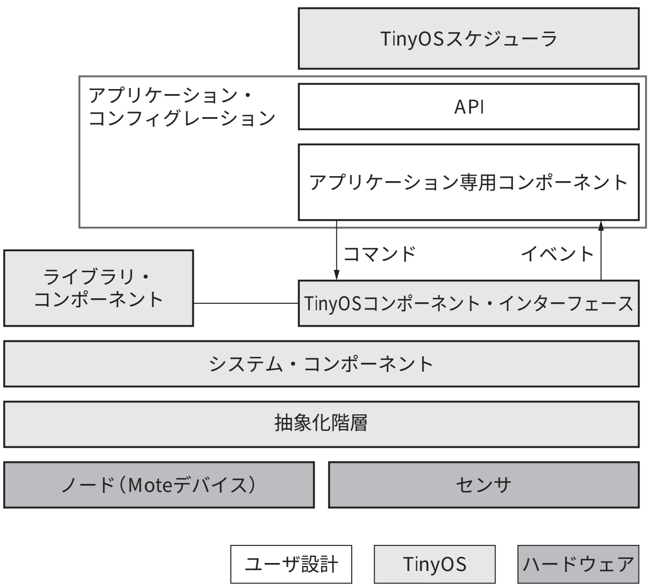


図4　TinyOS アプリケーションのコンポーネント
アプリケーション・ソフトウェアの設計者は，特定のセンシング・アプリケーションの開発に専念できる．また，ほかのTinyOS コンポーネントとのインターフェースも可能．特定のアプリケーションに要求されるコンポーネントのみコンパイルすればよい．

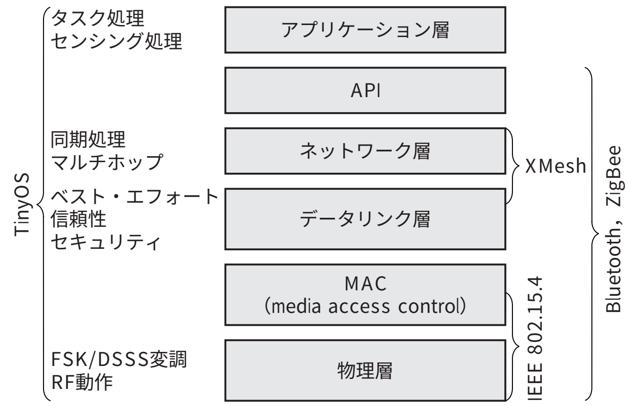


図5　OSI 参照モデルとTinyOS の関係
XMesh は，Crossbow 社が開発したメッシュ・ネットワーク向けの通信プロトコル．

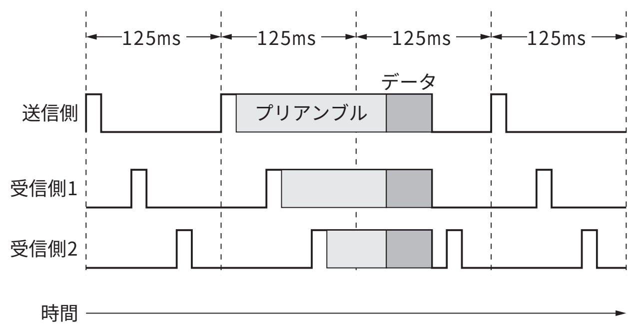


図6　低電力リスニング（FSK の場合）
受信側の任意のノードが起動して，必要に応じてデータを受信できるように，プリアンブルを140ms 長としている．

のような機能を搭載した組み込みOSも存在しますが，ゲートウェイ・クラスのノードに使用されているLinuxなどのOSには装備されていません．

アプリケーション・レベルのソフトウェアが正確にハードウェアを制御することには，デメリットもあります．それは，ハードウェア専用モジュールに対して，センサ・ネットワーク・ソフトウェアの移植性が失われる可能性がある点です．本OSは，ハードウェアの抽象化により，正確な制御を失わずに移植性を維持することを目指しています．また，アプリケーションを開発しやすくするための実行環境（インタープリタ）も提供します．現段階では，リソースを仮想化しながらいかに高効率を保証するかという課題が一部残されています．

● メッシュ・ネットワーク向けのプロトコルを開発

TinyOSそのものは，OSIネットワーク参照モデルのすべての階層をサポートしています（**図5**）．また，本OSはオープン・ソースなので，アプリケーションの要求にこたえるため，どの階層の機能にも手を入れることができます．

筆者ら（米国Crossbow Technology社）が開発したメッシュ・ネットワーク用通信プロトコル「XMesh」は，本OSのアプリケーション・ソフトウェアをサポートするための無線ネットワーキング/制御プラットホームです．XMeshは，ZigBee v1.0 プロトコルにも同時に対応できるように設計されています．

本通信プロトコルの重要な特徴の一つは，低消費電力のメッシュ・ネットワークを実現することです．現在のところ，単3アルカリ電池2本で年単位の稼働を可能にするために，同期低電力リスニングと低電力リスニングの二つのアルゴリズムを用います．

まず，低電力リスニングですが，これは次のような手順で実行されます（**図6**）．

1）送信ノードがデータ・パケットの前にプリアンブル（同期信号）を付加する．プリアンブルは，受信側の任意のノードが起動してから必要に応じてデータを受信できるように，140ms長（固定）としている

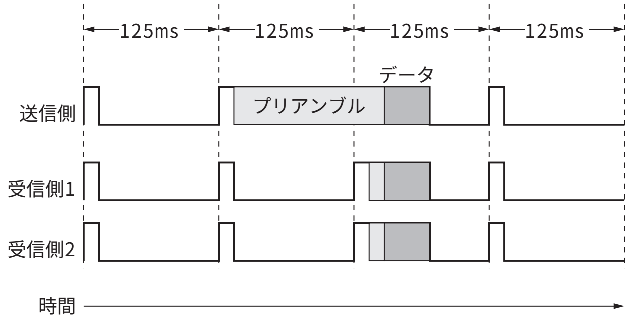


図7　同期低電力リスニング（FSKの場合）
プリアンブルは，アプリケーションで要求されるQoS（quality of service）に応じて，2ms～140msに設定される．

2）受信側ノードは，1s（秒）の間に8回起動し，無線チャネルを受信する
3）プリアンブルを検知すると，データを受信する
4）無線チャネルが空きの場合，必要に応じてデータを送信する

同期低電力リスニングは，以下の手順で行われます（**図7**）．

1）送信側は，データ・パケットの前に可変長のプリアンブルを付加する．プリアンブルは，アプリケーションで要求されるQoS（quality of service）注4に応じて，2ms～140msに設定される
2）ネットワーク内のすべてのノードの時間同期がとられ，ノードはプリアンブルが終了する付近で起動する
3）プリアンブルを検知すると，データを受信する
4）無線チャネルが空いていれば，データを送信する

このように，送信側からのプリアンブル信号を受け取ったときのみ受信を行うことで，ネットワーク全体の無線メッセージ数を削減し，結果として電池寿命を延ばすことができるわけです．

参考・引用*文献

（1）F. Zhao and Leonidas Guibas；*Wireless Sensor Networks：An Information Processing Approach*, Morgan Kaufmann Publisher, 2004.
（2）J. Hill, M. Horton, R. Kling, L. Krishnamurthy；“The Platforms Enabling Wireless Sensor Networks”, *review for CACM*, Jan. 2004.
（3）J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, K. Pister；“System architecture directions for network sensors”, *Proc. of ASPLOS 2000*，Cambridge，Nov. 2000.
（4）Phil Levis and David Culler；“Maté: a Virtual Machine for Tiny Networked Sensors”, *Proc. of ASPLOS 2002*，Dec. 2002.
（5）L. Girod, J. Elson, A. Cerpa, T. Stathopoulos, N. Ramanathan, D. Estrin；“EmStar：An Environment for Developing Wireless Embedded Systems Software”，***CENS Technical Report 0034***，Dec. 16, 2003.
（6）S. R. Madden, R. Szewczyk, M. J. Franklin and D. Culler；“Supporting Aggregate Queries Over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks”, *Proc. of Workshop on Mobile Computing and Systems Applications*，2002.
（7）*SensorWare：A virtual machine and interactive environment for the programming / manipulation of sensor networks*，http://www.cs.ucla.edu/~roy/swAndEmStar.html.
（8）J. Hill and D. Culler；“Mica：A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks”, ***IEEE Micro***，vol.22(6)，pp.12-24，Nov./Dec. 2002.
（9）J. Hill and D. Culler；“System Architecture for Wireless Sensor Networks”, *PhD thesis*，UC Berkeley，2004.
（10）Atmel；*ATmega128(L) data sheet*，http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf.
（11）Chipcon；*CC1020 data sheet*，http://www.chipcon.com/files/CC1020_Data_Sheet_1_4.pdf.

注4：アプリケーションが保証するサービスの品質．例えば，ネットワークにおける通信速度など．

John Suh，Michael Horton
米国Crossbow Technology社
http://www.smartdust.jp/，http://www.xbow.com/
なかむら・ちよかた
クロスボー（株）

<筆者プロフィール>

John Suh．Crossbow社のSenior Application Engineer．顧客に対するセンサ・ネットワーク構築のサポートや，国内外でのセンサ・ネットワークに関する技術セミナを行っている．米国GMI Engineering & Management Institute（現在，Kettering University）のElectrical Engineeringの学士号，米国Stanford Universityの修士・博士号を取得．MEMS技術に広い専門知識を持つ．
Mike A. Horton．Crossbow社のPresidentおよびCEO．同社の設立者の一人である．設立当初はMEMS技術を用いた加速度センサや傾きセンサなどの開発を手がけ，現在は慣性センサや無線センサ・ネットワーク・プラットホームの開発も行っている．UC BerkeleyのElectrical Engineeringの学士・修士号を取得．
中村千代賢．クロスボーVP営業．RF部品，無線機器の海外技術営業を歴任．1998年より住友精密工業にてMEMSセンサ技術営業．2005年5月のクロスボー設立より現職．カナダMcGill Universityの工学部を卒業．